

SF-STAMP 光学系を用いた超高速 2 次元バーストイメージングの性能拡張

および微分干渉顕微光学系の構築

Improvement of ultrafast 2D-burst imaging method by

Sequentially Timed All-optical Mapping Photography utilizing Spectral Filtering (SF-STAMP)

and construction of differential interference contrast microscopy system

鈴木 敬和 (M1), 肥田 遼平 (B4), 植田 隆太 (B4), 伊佐 文宏 (M2)

Takakazu Suzuki, Ryohei Hida, Ryuta Ueda, Fumihito Isa

Abstract

We improve a system performance of STAMP (Sequentially timed all-optical mapping photography) for single shot ultrafast 2D-burst imaging. A Newly developed SF-STAMP system is composed of a diffractive optical element (DOE), a band-pass filter, and two Fourier transform lenses. Using a 25-beam generating DOE, the total number of frames in a single-shot increases up to 25. We capture ultrafast phenomena with sub-picosecond temporal resolution using a frequency-chirped broadband pulse.

1. はじめに

超高速現象の解明のために、ポンプ・プローブ法やストリークカメラの利用などの時間分解計測法が広く利用されている。しかし、ポンプ・プローブ計測法は繰り返し計測を要するため、単発現象やランダム現象を正確に計測することは困難である。一方でストリークカメラは単発現象を連続的に計測可能ではあるが得られる情報は 1 次元情報のみである。近年、2 次元超高速撮像法として STEAM [1], CUP [2], STAMP [3] が考案され、ナノ秒オーダーの連続撮影やピコ秒領域のシングルショットバースト撮影が実現されている。

現在のところ、STAMP 法は世界最高速のシャッター速度を実現するシングルショット連写撮影手

法でありサブピコ秒の時間分解能を有する。この手法では、線形周波数チャープパルス光源として利用し、波長分散の大きさによって各瞬間周波数ごとの遅延時間を対応させることで「周波数-時間」の対応関係を得る。さらにこの瞬間周波数を時間軸に対応させるアイデアに加え、各周波数成分を単一のイメージセンサ上に空間的にマッピングすることでシングルショット 2 次元バースト撮影が可能になる。しかし、空間マッピングを行うために特殊なペリスコープアレイ構造を持つ $4f$ イメージング光学系 [3, 4] が必要になる。このペリスコープアレイの数が STAMP の撮影可能コマ数を決定するので現在のところ STAMP の同時撮影スナップショットのコマ数は 6 枚である。昨年、我々は STAMP の撮影枚数をより容易に増加させる手法として STRIPED FISH [5] のアイデアを STAMP に応用した STAMP utilizing Spectral Filtering (SF-STAMP) [6] の原理実証を行った (同時撮影枚数: 5 枚)。本研究では、SF-STAMP 光学系を改良し 25 枚同時シングルショット撮影を実現する。また、微分干渉顕微光学系を構築し SF-STAMP 光学系と組み合わせることで超高速位相差イメージングを行う。

2. SF-STAMP

SF-STAMP 光学系の概要図を Fig. 1 に示す。SF-STAMP 光学系は、2 枚のレンズ、DOE (回折光学素子)、BPF (Band-pass filter) から構成される $4f$ 結

像光学系である。Object面のイメージが1枚目のレンズ(焦点距離 f_1)で光学的にフーリエ変換され、DOEを配置する面がフーリエ面になる。その後、DOEで複製されたアレイビームは傾けて配置したBPFに異なる角度で入射することで波長選択が行われ2枚目のレンズ(焦点距離 f_2)によって光学的に逆フーリエ変換される。その結果、Image面に配置したCCDの受光面上に空間的に分散した2次元のマルチスペクトルイメージが同時に結像される。したがって、STAMP同様に、フラッシュ光に線形周波数チャープパルスを用いることで、CCD面上で結像されるマルチスペクトルイメージは時間差の付いたスナップショット画像となり、フラッシュ光1パルスがBPFで選択される長波長端から短波長端までの波長帯域幅に対応する時間幅を計測時間窓とするシングルショット超高速バースト撮影が実現される [6]。Fig. 2 に示すように、SF-STAMPの同時撮影コマ数はDOEから分岐するアレイビームの数により決定する。したがって、SF-STAMPシステムはペリスコープアレイを利用するSTAMPシステムよりも簡素かつ柔軟性をもつ。

以下では、25ビーム分岐DOEの設計、25スペクトルイメージ同時撮影SF-STAMP光学系の構築、微分干渉顕微光学系の構築について述べる。

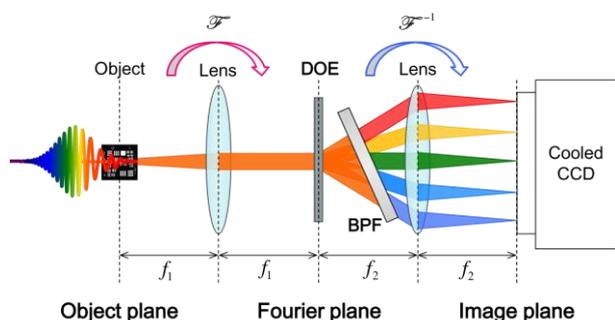


Fig. 1. Schematic setup of SF-STAMP.

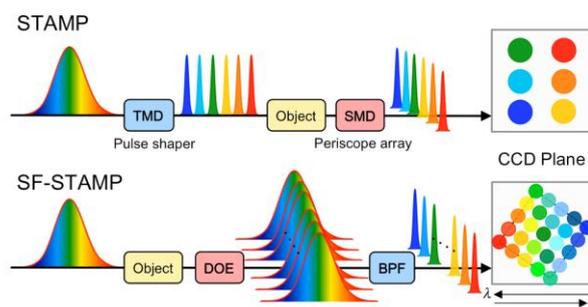


Fig. 2. Comparison of the mechanism of 2D-burst imaging in STAMP and SF-STAMP (TMD: Time Mapping Device, SMD: Spatially Mapping Device).

3. 実験セットアップ

3.1. 25ビーム分岐DOEの設計

SF-STAMPによる同時撮影枚数を増加させるために新たに25ビーム分岐DOEを作製した。原理実証を行った5コマSF-STAMP光学系では市販の5ビーム分岐DOE (HOLOEYE, DE 225, 回折広がり角 $10.2^\circ @ 800\text{ nm}$)を用いた。

今回は、分岐ビーム数および回折広がり角を拡大し、同時撮影枚数および1ショットにおける波長選択幅(計測時間窓に相当)の拡大を目指し Fig. 3 に示す特性をもつDOEを特注した。

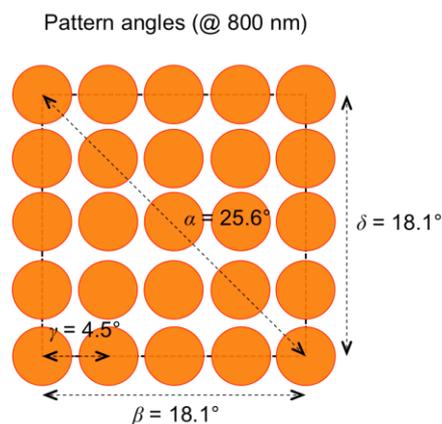


Fig. 3. Specification of 25-beam generating DOE (@800 nm).

25 ビーム分岐 DOE の波長 800 nm における回折広がり角は 25.6°である。このパラメータは入手可能な大口径 CCD イメージセンサの受光面の大きさ (36.1 mm × 24.0 mm) に収まるように決定した (Fig. 4).

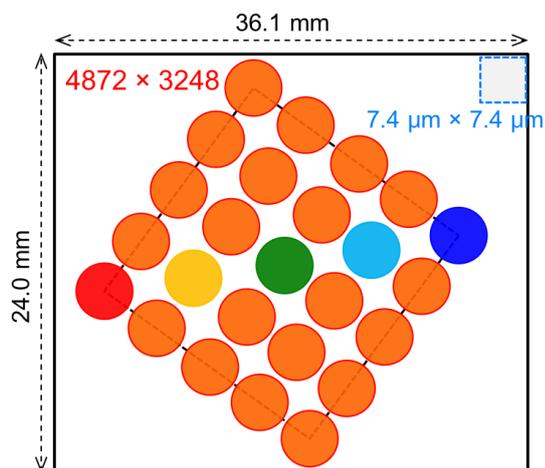


Fig. 4. Schematic of 25 beams on the widest CCD plane.

3.2. 25 スペクトラルイメージ同時撮影 SF-STAMP 光学系の構築

SF-STAMP による同時撮影枚数を増加させるために設計した 25 ビーム分岐 DOE (HOLOEYE, customized model), 大口径冷却 CCD (BITLAN, BU-55LN) を使用した。受光面のサイズは 24.0 mm × 36.1 mm, ピクセルサイズは 7.4 μm × 7.4 μm, 総ピクセル数は 4872 × 3248 である。基本的な SF-STAMP 光学系の構成は Fig. 1 と同様である。したがって、サンプルの情報を含んだ線形周波数チャープパルス (プローブ光) が 1 枚目のレンズ ($f = 50$ mm) を伝搬し, DOE により $5 \times 5 = 25$ 個のアレイビームに複製され, 中心波長 830 nm, スペクトル幅 2.2 nm (FWHM) の BPF (IRIDIAN, ZX000167) で波長選択された後, 2 枚目のレンズ ($f = 50$ mm) により冷却 CCD の受光面上の異なる位置に 25 波長

分のスペクトラルイメージが結像される。Object 面に USAF テストターゲットを置いた際に得られる 25 スペクトラルイメージを Fig. 5 に示す。各スペクトラルイメージは 450 × 450 ピクセルを占める。

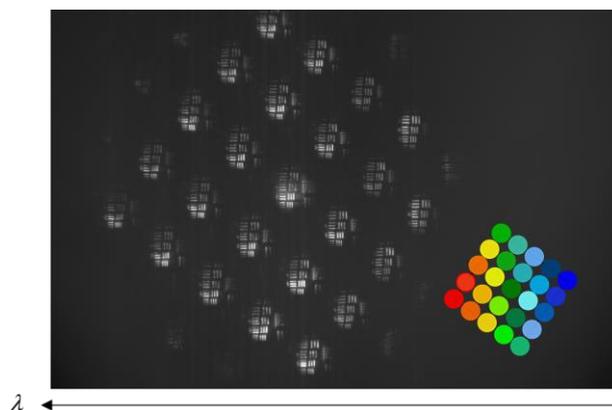


Fig. 5. A multispectral image captured by SF-STAMP system which contained 25 different spectral band images.

3.3. 微分干渉顕微光学系の構築

SF-STAMP による超高速位相イメージングを実現するために微分干渉顕微鏡 (Differential Interference Contrast microscopy: DIC) の原理に基づいた顕微光学系の構築を行った。Fig. 6 に DIC の原理を示す。

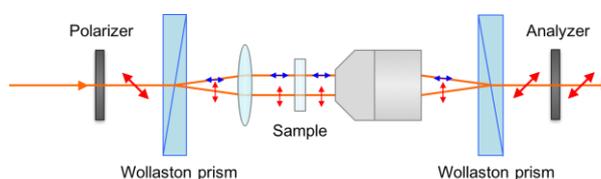


Fig. 6. Principle of differential interference contrast microscopy.

基本的な構成は、明視野顕微光学系を偏光子とウオラストン(DIC)プリズムで挟まれた構成である。1 枚目の偏光子で斜め偏光になった光は DIC プリズムで直交する二つの直線偏光成分に分離する。その

後サンプルの極わずかに異なった位置を通過し、2枚目のDICプリズムで合波し、2つの経路の屈折率差を位相差に変換する。DICプリズムにはOLYMPUS社製U-DICRを使用した。

また、SF-STAMP光学系は4f結像光学系がベースになっているためObject面に像を転写することで、本実験で構築した微分干渉顕微光学系とのアレンジが可能である。Fig. 7にセットアップを示す。

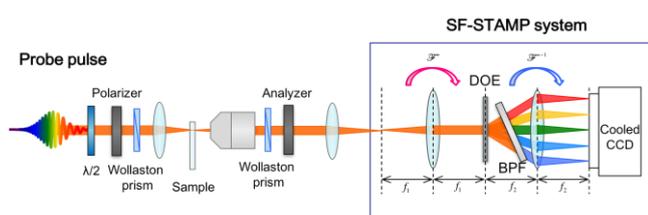


Fig. 7. Setup of SF-STAMP system combined with differential interference contrast microscopy.

3.4. 1ショット25枚同時バースト撮影

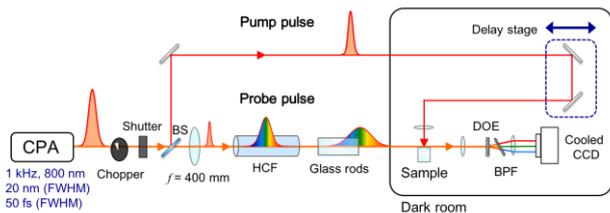


Fig. 8. Experimental setup of ultrafast imaging by SF-STAMP (BS: beam splitter, HCF: hollow-core fiber filled with Ar-gas, DOE: diffractive optical element, BPF: band-pass filter).

SF-STAMPによる超高速イメージングの実験セットアップをFig. 8に示す。25コマ光源にはモードロックTi:Sapphireレーザをチャープパルス増幅器(CPA)により増幅したフェムト秒レーザパルス(中心波長800 nm, スペクトル幅20 nm, パルス幅

50 fs, 平均出力パワー1.1 W, 繰り返し周波数1 kHz)を用いた。広帯域パルスを得るために、集光レンズ($f = 400$ mm)でArガス封入中空ファイバ(ファイバ長400 mm, コア径126 μm)に入射させ、自己位相変調により広帯域化(>200 nm)させた。その後、光学ガラス(N-SF10 ($D_{\text{N-SF10}} = -468.9$ ps/km \cdot nm), BK7 ($D_{\text{BK-7}} = -149$ ps/km \cdot nm))を用いて線形周波数チャープを与え、パルス幅を伸張し、プローブ光として利用した。また、ポンプ光には中空ファイバの手前で分けたCPAから出射されるFTLパルスを使用した。なお、シングルショット撮影のために光学チョップおよびシャッターをポンプ光とプローブ光に分離する手前に用いて単パルスを切り出した。

4. 実験結果

改良したSF-STAMPを用いて、薄膜ガラス(厚さ50 μm)内部にポンプ光を集光させ、透明材料の内部屈折率変化の超高速ダイナミクスのシングルショット25コマ超高速撮影を行った。プローブ光の広帯域パルスには光学ガラスを伝搬させることで $D \times z = 0.14$ (ps/nm)の線形チャープを加えた。今回新たに用いた25ビーム分岐DOEとBPFの組み合わせで実現できるシングルショットの波長帯域幅は $D/\text{window} = 40$ nm (Fig. 9参照, 785 nm~825 nm)であり、時間窓は5.6 ps, フレーム間隔は0.2 psとなる。

SF-STAMPの1ショットで得られる波長帯域幅を D/window とすると、計測時間窓 DT はEq. (1)で表現される。

$$DT = D \times z \cdot D/\text{window} \quad (1)$$

ただし、 D (ps/km \cdot nm)は分散パラメータ、 z (km)は分散媒質の長さである。したがって、計測時間窓は、フラッシュ光に付加する線形周波数チャープ量(2次

分散量) $D \times z$ (ps/ nm) により可変となる. 今回の BPF1 枚のみによる波長帯域幅は ~ 40 nm であるが, 1 パルスの時間幅を少ない 2 次分散量で伸張させるためには, 波長帯域幅 D / window の広い広帯域パルスが有用になる.

Fig. 10 に内部屈折率変化の超高速ダイナミクスのシングルショット 25 コマ撮影の結果を示す. なお, 各波長イメージは 740×480 ピクセルであり, 結果に示した画像はいずれも変化前との差分を取り, コントラストを調整したものである. 計測時間窓 5.6 ps の間に集光点付近にプラズマフィラメントが形成される様子が観測され, SF-STAMP の撮影枚数の増加が実現された.

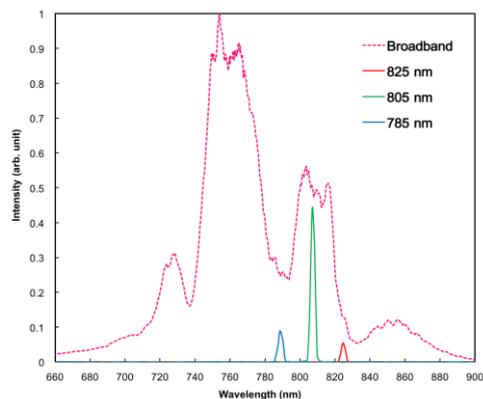


Fig. 9. Spectral properties of broadband pulse and 25-frame SF-STAMP system.

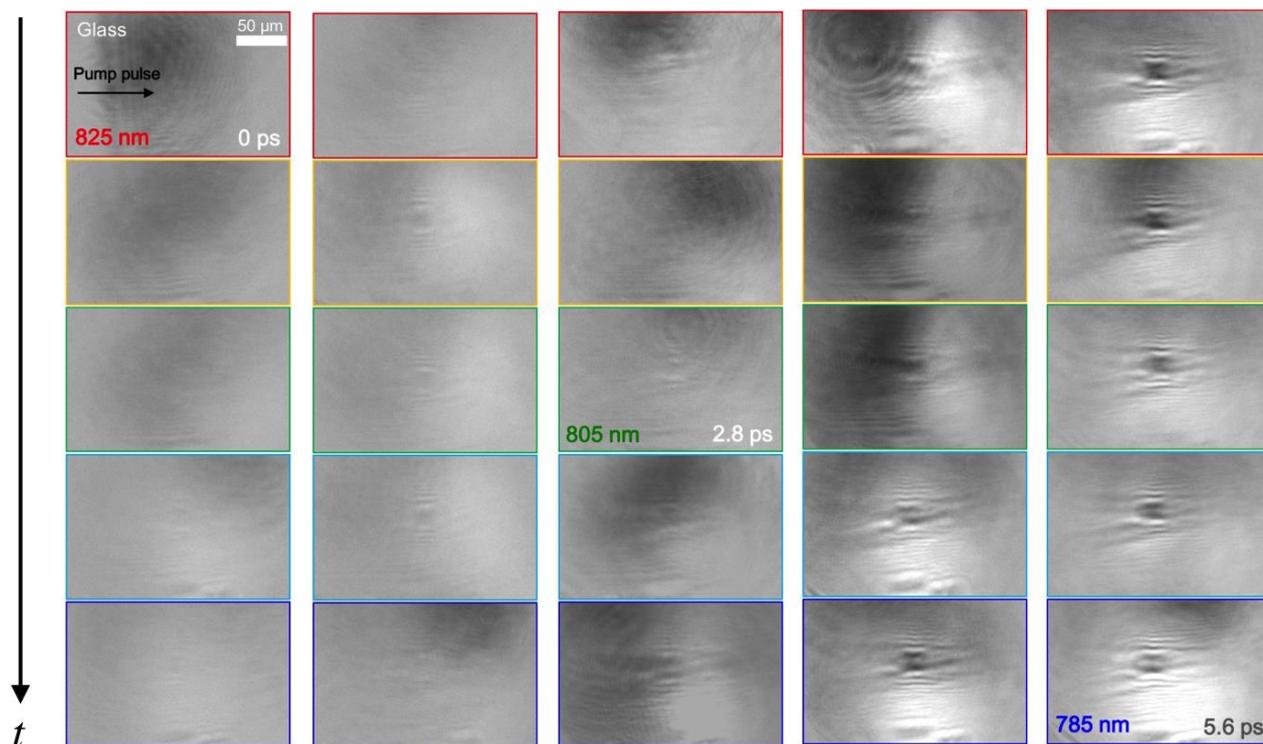


Fig. 10 Measured images of generation of a plasma filament inside a glass (single-shot time window of 5.6 ps).

5. まとめ

本研究では、シングルショット超高速2次元バーストイメージングを実現する SF-STAMP の性能拡張および 25 コマ同時撮影の原理実証を行った。使用する DOE を 25 ビーム分岐 DOE に変えたことにより 1 ショットで利用できる波長帯域幅は 40 nm まで拡大した。しかし、単独の BPF では広帯域線形周波数チャープパルスの周波数成分を存分に利用できていないので今後は、BPF アレイを用いて 25 ビームの波長を個々に選択し波長帯域幅は ~150 nm (810 nm~666 nm) の実現を目指す。波長帯域幅が拡大することで計測時間窓も拡大するので、広帯域パルスにチャープを与えることでサブナノ秒 (10^{-10} s) 程度までの計測時間窓が可能である。

References

1. K. Goda, K. K. Tsia, and B. Jalali, “Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena,” *Nature* **458**(7242), 1145 (2009).
2. L. Gao, J. Liang, C. Li, and L. V. Wang, “Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second,” *Nature* **516**(7529), 74 (2014).
3. K. Nakagawa, A. Iwasaki, Y. Oishi, R. Horisaki, A. Tsukamoto, A. Nakamura, K. Hirosawa, H. Liao, T. Ushida, K. Goda, F. Kannari, and I. Sakuma, “Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP),” *Nat. Photonics* **8**(9), 695 (2014).
4. K. Hashimoto, H. Mizuno, K. Nakagawa, R. Horisaki, A. Iwasaki, F. Kannari, I. Sakuma, and K. Goda, “High-speed multispectral videography with a periscope array in a spectral shaper,” *Opt. Lett.* **39**(24), 6942 (2014).
5. P. Gabolde and R. Trebino, “Single-frame measurement of the complete spatiotemporal intensity and phase of ultrashort laser pulses using wavelength-multiplexed digital holography,” *J. Opt. Soc. Am. B* **25**(6), A25 (2008).
6. T. Suzuki, F. Isa, L. Fujii, K. Hirosawa, K. Nakagawa, K. Goda, I. Sakuma, and F. Kannari, “Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) utilizing spectral filtering,” *Opt. Express* **23**(23), 30512 (2015).